

方案选择式区域协调控制方法及应用

沈国江, 陈文峰

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:针对方案生成式区域协调控制的不足,提出了一种全新的方案选择式区域协调控制方法.该方法根据实测交通数据,合理选择信号周期时间、绿信比和相位差 3 个控制参数,形成最实用的区域协调控制配时方案.介绍了协调路径和协调相位的确定方法,重点研究了 3 个控制参数的选择算法.其中,信号周期时间基于关键路口的饱和度进行选择与微调;绿信比根据路口的相位饱和度及其均值和均方差进行选择与优化;相位差的选择根据下游协调相位饱和度的变化,通过速度选择来间接实现.实际应用表明:该方法与方案生成式方法相比,平均车辆延误、平均旅行时间和平均排队长度均得到了较大改善.

关键词:智能交通系统;交通信号;方案选择;方案生成;协调控制

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1006-4303(2016)03-0237-05

Regional coordinated control method based on decision-selection and its application

SHEN Guojiang, CHEN Wenfeng

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the existing problem in the regional decision-generation coordinated control, a novel regional coordination control method based on decision-selection method is proposed. According to real-time traffic data, the three control parameters including signal cycle time, green signal ratio and phase difference can be selected properly and the most practical regional coordinated control scheme is formed. Firstly, the determining method of coordination path and the coordination phase is introduced, and then the selection algorithms of three control parameters are studied emphatically. The signal cycle time can be selected and adjusted according to the saturation of key intersections. The green signal ratio can be selected and optimized according to the saturation of key intersections, its mean and variance. The phase difference can be selected through speed selection according to the change of coordination phase saturation in the downstream indirectly. The practical application shows that the proposed method can improve significantly the average vehicle delay, average travel time and average queue length compared to the decision-generation method.

Keywords: intelligent transportation system; traffic signal; decision-selection; decision-generation; coordinated control

收稿日期:2015-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174174);浙江省科技厅公益技术研究工业项目(2015C31059);浙江省交通运输厅科研计划项目(2014T08)

作者简介:沈国江(1975—),男,浙江绍兴人,教授,研究方向为城市道路交通建模、优化与控制技术等, E-mail: gjshe1975@zjut.edu.cn.

区域协调控制是指将区域内多个路口的交通流运行作为一个整体,采用相互关联、协调运营的区域整体交通信号控制方案,对区域内多个路口进行信号协调控制^[1].按控制方式划分,区域协调控制可以分为方案生成式控制和方案选择式控制,前者自动计算最佳的区域协调配时方案^[2-4],后者通过交通模式匹配选取最实用的配时方案^[5-7].理论上方案生成式控制方案应该是最优的.但在实际应用中,一方面由于受到检测设备的精度及可靠性影响,往往很难实现最优控制,另一方面由于算法过于复杂,偶尔会出现无解的情况,影响协调控制效果.而方案选择式区域协调控制是通过交通状态的模式匹配,总是可以找到一种最实用的控制方案,而且通过模型和参数的自适应修正,能够实现区域协调的次优控制^[8-9].

笔者提出了一种全新的方案选择式区域交通协调控制方法,该方法包括 4 个模块:初始模块、信号周期模块、绿信比模块和相位差模块.与现有的方案选择式控制方法不同,不是选择预设的完整协调配时方案,而是分别选择合适的信号周期、绿信比及相位差,可明显增强控制算法的灵活性和鲁棒性.

1 初始化

根据交通流理论,控制方案的变换间隔不能太小,否则方案变换产生的集结或消散波有可能造成交通絮流,引起进一步的交通阻塞^[2].因此,在一个阶段(通常为 8 个信号周期)内,信号周期时间和相位差保持不变或只作微调,而绿信比在每个信号周期末重新选择.

1.1 信号控制时段

根据被控区域内交通特性统计变化,按不同的日期类型(节假日、周末和工作日等),把一天划分为若干个时段.典型的时段划分为:早高峰时段、上午平峰时段、午间高峰时段、下午平峰时段、晚高峰时段、晚间平峰时段和夜间低峰时段.对于时段的划分,可以根据交通状态识别算法来确定,但常用的是根据交警按经验来划分^[10].

1.2 信号相位与协调路径

根据被控区域内各道路等级和交通流分布历史统计数据,人工事先确定区域协调方向,然后确定各路口的相位组成和协调相位.如图 1 所示,某被控区域由三条横向道路 x_1 , x_2 和 x_3 以及四条纵向道路 y_1 , y_2 , y_3 和 y_4 组成,包含了 12 个路口,其中 6 号路

口为关键路口.一般来讲,关键路口所在的道路等级肯定是最高的,假定该区域的道路等级如表 1 所示.

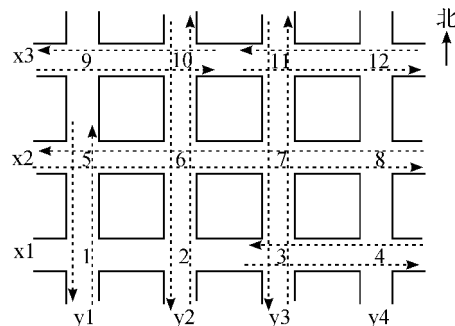


图 1 协调路径示意图

Fig. 1 The structure sketch of coordinated path

表 1 道路等级表

Table 1 The road grade

序号	等级	道路编号
1	1 级	x_2, y_2, y_3
2	2 级	x_3, y_1
3	3 级	x_1
4	4 级	y_4

根据道路的等级,从关键路口出发确定区域的协调路径.首先,把关键路口所在道路 x_2 和 y_2 均设置为双向协调路径;然后,把剩下 1 级道路也设置为双向协调路径,如 y_3 ;接着,把 2 级道路 x_3 和 y_1 设置为双向协调路径,但是为了防止形成闭环,可以设置成分段协调,譬如在道路 x_3 中,9 号与 10 号路口以及 11 号与 12 号路口两两协调;最后,只要不形成闭环,可以继续把剩下的道路按级别高低依次设置双向协调路径,如道路 x_1 上的路口 3 和路口 4.

不同时段内各路口相位组成和区域内协调方向可以不同.此外,还需根据各流向交通流大小,确定各相位的优先级,一般来讲,协调相位的优先级最高.

1.3 信号周期方案库

根据每个时段内关键路口历史交通流量统计,确定该时段的最大周期时间 T_{\max} 、最小周期时间 T_{\min} 和周期间隔时间 ΔT ,每个可选信号周期被选中的初始频率 f_T .各时段信号周期方案要有重叠,确保时段切换时信号周期平稳过渡.譬如,早高峰时段的信号周期方案可选周期时间分别为 100,120,140,160,180,200 s,初始选中频率分别为 1,3,5,6,4,2, $T_{\max} = 200$ s, $T_{\min} = 100$ s, $\Delta T = 20$ s;平峰时段的信号周期方案可选周期时间分别为 60,75,90,105,120,135 s,初始选中频率分别为 1,3,5,6,4,2, $T_{\max} = 135$ s, $T_{\min} = 60$ s, $\Delta T = 15$ s.

1.4 绿信比方案库

根据每个时段内各路口交通流历史统计数据,

事先配置各个时段每个路口可选的绿信比方案以及每个可选绿信比被选中的初始频率 f_{λ} 。譬如,对于某个由3个相位组成的路口,其中1号相位为协调相位,则早高峰时段的绿信比方案可选绿信比分别为 $(0.6, 0.2, 0.2)$, $(0.5, 0.3, 0.2)$, $(0.4, 0.3, 0.3)$, $(0.4, 0.4, 0.2)$, 初始选中频率分别为 2, 4, 3, 1。

1.5 速度方案库

根据每个时段被控区域内各路段的交通流历史统计数据以及路段限速值 v_L , 事先配置各个时段每个路段可选的速度方案以及每个可选速度被选中的初始频率 f_v 。譬如,某条路段 $v_L = 60$ km/h, 则早高峰时段的速度可选方案可选速度分别为 10, 15, 20, 25, 30, 35 km/h, 初始选中频率分别为 1, 2, 3, 6, 5, 3。

2 控制策略

2.1 信号周期选择与微调

根据交通控制理论,如果周期时间过大,饱和度较低,反之,则饱和度过大。据此,可根据关键路口饱和度的大小来选择合理的周期时间,使饱和度维持在 0.7 附近。图 2 为信号周期选择与微调流程图,图中 m_T 为信号周期微调间隔, $m_T \in \{0, 2, 4\}$, $m_T > 0$ 表示在一个阶段内,每隔 m_T 个信号周期微调周期时间 1 次; $m_T = 0$ 表示周期时间不作微调。

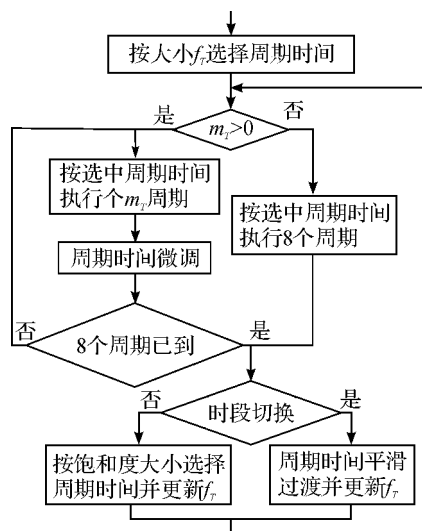


图2 信号周期选择与微调流程

Fig. 2 The process of Signal cycle selection and adjustment

启动时,选择对应时段的信号周期方案中被选中频率最高的值作为即将采用的周期时间 T ,即

$$\max\{f_{T,1}, f_{T,2}, \dots, f_{T,N_T}\} \quad (1)$$

式中: $f_{T,i}$ 和 T_i 分别为最高的被选中频率和对应的周期时间; N_T 为可选周期时间数目。

在同一阶段内,对周期时间进行微调,可以按式

$$T = \begin{cases} T + \Delta T/m_T & x \geq x_{\max} \\ T & x \in (x_{\min}, x_{\max}) \\ T - \Delta T/m_T & x \leq x_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为关键路口的饱和度; x_{\min} 和 x_{\max} 为用于周期时间微调的饱和度上、下限值,建议 $x_{\min} = 0.65$, $x_{\max} = 0.75$ 。

当一个阶段执行完后,对周期时间进行重新选择,分两种情况:

1) 同时段内选择

周期时间根据关键路口的饱和度在同一时段内的可选信号周期方案中进行选择,并对选中的周期时间所对应的被选频率进行更新,即

$$\begin{cases} T = T_{i+1}, f_{T,i+1} ++ & x \geq x'_{\max} \\ T = T_i, f_{T,i} ++ & x \in (x'_{\min}, x'_{\max}) \\ T = T_{i-1}, f_{T,i-1} ++ & x \leq x'_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中: i 为上一次选择的周期时间序号,若 $i-1 < 1$, 则 $i-1 = 1$, 若 $i+1 > N_T$, 则 $i+1 = N_T$; x'_{\min} 和 x'_{\max} 为用于周期时间选择的饱和度上、下限值,建议 $x'_{\min} = 0.6$, $x'_{\max} = 0.8$ 。

2) 跨时段选择

周期时间在新时段的可选信号周期方案中进行选择,同样需对选中周期时间对应的被选频率进行更新,即

$$\begin{cases} T = T_{N_T}, f_{T,N_T} ++ & T \geq T_{N_T} \\ T = T_{i+1}, f_{T,i+1} ++ & T \in (T_1, T_{N_T}) \text{ 且 } x \geq x'_{\max} \\ T = T_i, f_{T,i} ++ & T \in (T_1, T_{N_T}) \text{ 且 } x \in (x'_{\min}, x'_{\max}) \\ T = T_{i-1}, f_{T,i-1} ++ & T \in (T_1, T_{N_T}) \text{ 且 } x \leq x'_{\min} \\ T = T_1, f_{T,1} ++ & T \leq T_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: i 为上时段结束时周期时间值在新时段可选信号周期方案中对应的序号。

如果区域内存在半周期路口,为了尽可能获得协调效果,第二个周期时间为各相位最小绿灯时间、黄灯时间和全红清空时间之和,第一个周期时间为公共周期时间减去第二个周期时间的差,即

$$T_2 = \sum_{j=1}^n (t_{g,\min,j} + t_{y,j} + t_{r,j}), T_1 = T - T_2 \quad (5)$$

式中: $t_{g,\min,j}$, $t_{y,j}$ 和 $t_{r,j}$ 分别为相位 j 的最小绿灯时间、黄灯时间和全红时间; n 为相位数。

2.2 绿信比选择与优化

在周期时间一定的情况下,路口绿信比的分配主要是为了使各相位通行能力均衡。据此,可根据各相位饱和度的差异来选择合理的绿信比,如图 3 所示。

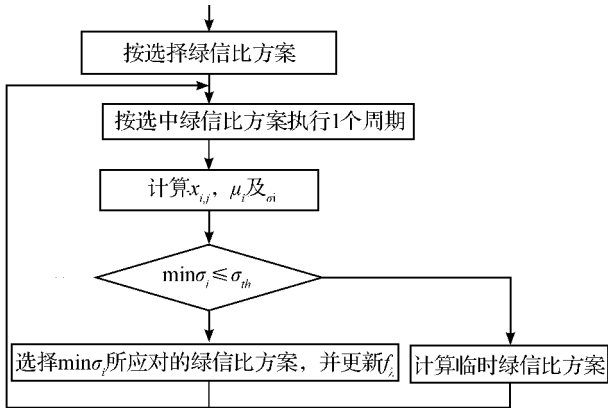


图3 绿信比方案选择与优化流程

Fig. 3 The process of split selection and optimization

启动时, 选择对应时段的绿信比方案中被选中频率最高的值作为即将采用的绿信比 λ , 即

$$\max(f_{\lambda,1}, f_{\lambda,2}, \dots, f_{\lambda,i}, \dots, f_{\lambda,N_\lambda}) \rightarrow \lambda = \lambda_i \quad (6)$$

式中: $f_{\lambda,i}$ 和 λ_i 分别为最高的被选中频率和对应的绿信比方案; N_λ 为可选绿信比方案数目。

当一个信号周期执行完后, 先计算在各可选绿信比方案下路口各相位的饱和度、饱和度均值及均方误差, 即

$$x_{i,j} = \frac{y_j}{\lambda_{i,j}}, \mu_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{i,j}}{n}, \sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \mu_i)^2}{n}} \quad (7)$$

式中: i 为可选绿信比方案的序号; j 为路口相位序号; n 为路口相位数; y_j 为相位 j 的关键车道流量比; $\lambda_{i,j}$ 和 $x_{i,j}$ 为第 i 个可选绿信比方案下相位 j 的绿信比和饱和度; μ_i 和 σ_i 为第 i 个可选绿信比方案下相位饱和度均值和均方误差。

假定在所有可选绿信比方案中, 第 i 个可选绿信比方案下饱和度均方误差最小。若 $\sigma_i \leq \sigma_{th}$ (建议 $\sigma_{th} = 0.18$), 则第 i 个可选绿信比方案被选中, 且 $f_{\lambda,i} = f_{\lambda,i} + 1$; 若 $\sigma_i > \sigma_{th}$, 则表示所有可选绿信比方案都不满足控制要求, 需对绿信比方案进行优化, 生成临时的绿信比方案。具体过程如下:

1) 将第 i 个绿信比方案下各相位的饱和度进行排序。

2) 将饱和度最小的相位绿信比减小 $\Delta\lambda$ (一般取该相位绿信比的 10%), 并将饱和度最大的相位绿信比增加 $\Delta\lambda$ 。

3) 按式(7)重新计算调整后的绿信比方案下相位饱和度的均方误差, 若该方差不大于 σ_{th} , 则说明调整后的绿信比方案符合控制要求, 把它作为临时绿信比方案存储, 并按该绿信比方案执行。若该方差仍大于 σ_{th} , 则重复第 1 步。

当该临时绿信比方案多次被选中后, 可将该临时方案替换该时段中被选中频率最低的绿信比方案。

2.3 相位差选择

根据交通流理论: 路段速度与路段上的车辆数有关, 路段车辆数越多, 车速就越慢。而路段上的车辆最终都要到达下游路口, 从而影响下游路口饱和度的变化。图 4 为路段速度选择的流程图。

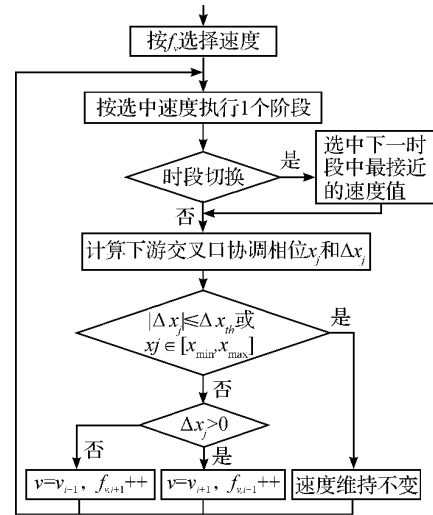


图4 速度选择流程

Fig. 4 The process of speed selection

启动时, 选择对应时段的速度方案中被选中频率最高的值作为即将采用的速度 v , 即

$$\max(f_{v,1}, f_{v,2}, \dots, f_{v,i}, \dots, f_{v,N_v}) \rightarrow v = v_i \quad (8)$$

式中: $f_{v,i}$ 和 v_i 分别为最高的被选中频率和对应的速度; N_v 为可选速度数目。

当一个阶段执行完后, 先计算下游路口协调相位的平均饱和度及平均饱和度变化, 其表达式为

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{i,j}}{8}, \Delta \bar{x}_j = \bar{x}_j - \bar{x}'_j \quad (9)$$

式中: $x_{i,j}$ 为一个阶段内第 i 个周期中协调相位 j 的饱和度; \bar{x}_j 和 \bar{x}'_j 分别为当前阶段和上一个阶段内协调相位 j 的平均饱和度; $\Delta \bar{x}_j$ 为协调相位 j 的平均饱和度变化。

速度选择和被选中频率更新公式为

$$\begin{cases} v = v_i, f_{v,i}++ \\ v = v_{i-1}, f_{v,i-1}++ \\ v = v_{i+1}, f_{v,i+1}++ \end{cases} \begin{cases} |\Delta \bar{x}_j| \leq \Delta x_{th} \text{ 或 } \bar{x}_j \in [x'_{min}, x'_{max}] \\ |\Delta \bar{x}_j| > \Delta x_{th} \text{ 且 } \bar{x}_j \notin [x'_{min}, x'_{max}] \text{ 且 } \bar{x}_j > \bar{x}'_j \\ |\Delta \bar{x}_j| > \Delta x_{th} \text{ 且 } \bar{x}_j \notin [x'_{min}, x'_{max}] \text{ 且 } \bar{x}_j < \bar{x}'_j \end{cases} \quad (10)$$

式中: Δx_{th} 为饱和度变化的临界值, 建议 $\Delta x_{th} = 0.1$; 若 i

$-1 < 1$, 则 $i-1=1$, 若 $i+1 > N_v$, 则 $i+1=N_v$.

3 实际应用

笔者提出的控制方法已于2014年下半年某市进行了实际应用. 图5为被控区域路网结构示意图, 带箭头的虚线表示协调路径. 该区域交通流具有以下特点: 1) 潮汐交通较为明显, 持续时间约半小时, 早高峰主要流向为由东向西和由南向北, 晚高峰流向反之; 2) 平峰时段流量随机性较大, 易引起短时间拥挤; 3) 流量主要集中在钱陶公路、湖中路和湖东路; 4) 车辆类型基本上都是小汽车, 非机动车流量较少, 交通混合特征不明显.

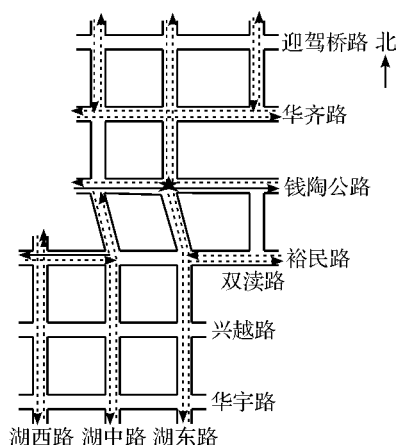


图5 被控区域路网结构

Fig. 5 The road network structure of controlled region

表2 实际应用效果

Table 2 The practical application effect

性能指标	结果对比	早高峰	晚高峰	平峰
平均车辆延误	实施前/(min·pcu ⁻¹)	8.2	9.3	3.1
	实施后/(min·pcu ⁻¹)	6.8	7.9	2.9
	改进/%	17.1	15.1	6.4
平均旅行时间	实施前/(min·pcu ⁻¹)	13.2	14.7	7.1
	实施后/(min·pcu ⁻¹)	10.8	12.2	6.8
	改进/%	18.2	17.0	4.2
平均排队长度	实施前/m	67	78	34
	实施后/m	47	57	29
	改进/%	29.9	26.9	14.7

系统连续运行半年多来, 总体稳定可靠. 经第三方检测, 与系统实施前采用的方案生成式干线绿波带协调控制方法相比, 平均车辆延误减少 6.4%~17.1%; 平均旅行时间减少 4.2%~12.2%; 平均排队长度缩短 14.7%~29.9%. 由表2可知: 高峰时段控制效果的改进明显大于平峰时段, 一方面是由于绿波带协调控制方法本身在交通欠饱和状态的平峰时段应用效果突出, 另一方面是相对于平峰时段

流量主要集中在钱陶公路、湖中路和湖东路, 高峰时段其他道路流量也比较大.

4 结论

笔者提出的方法根据实测交通信息, 在方案库中实时选择最佳的信号周期、绿信比和相位差, 形成最为实用的区域协调控制方案, 并根据实施效果对控制参数进行微调和优化. 该方法不仅计算简单、应用方便, 而且控制效果明显. 需要说明的是, 方案选择式和方案生成式这两种不同的区域协调控制方式, 各有不同的特色和应用场景, 在当今智能交通工程领域中都得到了广泛应用. 利用先进的信号优化控制理论, 综合这两种区域协调控制方式优点, 开发更加先进的交通控制技术, 或许是一种发展方向.

参考文献:

- [1] 隋亚刚, 李正熙, 刘小明, 等. 城市智能交通控制理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [2] 沈国江, 钱晓杰. 主干道动态协调控制技术[J]. 控制与决策, 2013, 28(12): 1907-1911.
- [3] LEE J H, LEE H K. Distributed and cooperative fuzzy controllers for traffic intersections group[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C: applications and reviews, 1999, 29(2): 263-271.
- [4] ROBERTSON D I, BRETHERTON R D. Optimizing networks of traffic signals in real time: the SCOOT method[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 1991, 40(1): 11-15.
- [5] DUTTA U, MCAVOY D S, LYNCH J, et al. Evaluation of the SCATS control system[R]. Michigan: Ohio University Transportation Center, 2008.
- [6] 卢凯, 吴焕, 杨兴, 等. 绿波协调控制方案的速度区间适应性分析与评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 60-66.
- [7] LOWRICE P R. The sydney coordinated adaptive traffic system-principles, methodology, algorithms[C]. London: IEEE International Conference on Road Traffic Signaling, 1982: 67-70.
- [8] 沈国江, 张伟. 城市道路智能交通控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9] STEVANOVIC A, KERGAJE C, MARTIN P T. SCOOT and SCATS: closer look into their operations[R]. Washington D C: 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2009.
- [10] KONG Q J, LI Z P, CHEN Y K, et al. An approach to urban traffic state estimation by fusing multisource information[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2009, 10(3): 499-511.

(责任编辑: 刘 岩)